適用於果菜類作物栽培之溫室

姚銘輝、梁連勝
農業試驗所 農工組

摘要

溫室披覆材料的光線穿透性是影響作物生長及發育的重要因子，本文收集多篇相關文獻，探討不同披覆材料對溫室內光質及光強的影響。此外，台灣夏天溫室降溫為重要的課題，在自然通氣無法將過多能量帶走前提下，披覆材料塗成白色或溫室遮蔭也是可考慮的降溫策略。此外，紫外光可誘導合成類黃酮，該物質是作物花色素的重要成分；因此，溫室栽種花卉作物應避免使用過濾紫外光的披覆材料。增加溫室內二氧化碳濃度有助於作物生長，但實際運用時，需考慮作物反應效率及設備使用方法，例如成本、氣候及二氧化碳之分布等。

關鍵字：溫室；披覆材料；光質；光敏素；穿透率

前言

由於人類對地球環境的過度開發及破壞，已經造成氣候的亟劇改變，尤其是地球暖化所衍生異常氣候發生的問題。而農作物栽培及農業生產與大氣環境息息相關，當氣象災害發生時，農作物損失常居災害損失的首位。因此，建立人工控制的栽培溫室日益普遍，除提供病蟲害防治及調節作物栽培曆外，防範氣象災害更是重點，尤其是防雨及防風部份。但溫室栽培仍存在一些障礙，如夏季高溫、高濕的問題，雖然透過自動化控制設備如水牆、風扇及灑水系統可以改善夏季栽培的困難，但對生產果菜類這種成本需求低廉的作物，栽培溫室在無降溫設備下，如何藉由被覆蓋材料的選擇，作物栽培技術改進及溫室內微氣象的探討，以提供建構適合溫室的參考是本文探討的主要內容。

溫室微氣象環境

地球氣候環境的改變肇因於人類大量使用石化原料及土地過度開發，使得以氣態方式存在的二氧化碳大量增加，而二氧化碳濃度和地球暖化有密切關係，一般稱為溫室效應(greenhouse effect)。而農業栽培溫室內高溫和大氣的溫

室效應有相同的機制，基本上，太陽輻射穿透溫室披覆材料，大部份光譜為土壤或作物群落(canopy)所吸收，少部份光譜反射回大氣中，其中紅外光(>740nm)是二氧化碳及水汽吸收波段，因此這些波段能量會滯留在溫室內而造成溫度昇高，除此之外，溫室夏季昇溫和密閉環境通氣率低及垂直對流減少也有關。

在探討溫室內部微氣象前，先說明大氣氣候環境的改變，因這會直接影響局地氣象。全球氣候因溫室效應而增溫約 0.5℃[15]，而姚等人(1999)針對我國過去 45 年氣象資料分析發現，各地也有 0.09-1.62℃的增溫現象。對作物栽培而言，溫度增高 1-2℃即會改變生育日數，但更重要為增溫是造成異常氣候頻率增加的原因之一[16]。面對氣候的不穩定及氣象預測的準確性仍不足，利用溫室調節栽培環境可維持作物穩定生產。

徐等人(1992 a,b)曾針對我國溫室微氣象變化作一系列研究，包括溫室內之熱收支、溫度、濕度及光環境等，以探討溫室座向(東西向及南北向)對洋香瓜及蔬菜栽培的影響。其中溫室熱收支之向上能量的分配部份，潛熱(latent heat)佔比率最高，可達 65-70%；可感熱(sensible heat)約佔 25-20%，而地中傳導之熱量僅佔 10%左右。在春夏兩季，溫室內濕度平均高於室外 20%，同時蒸發散量可達 4.5 mm／day 以上，顯然夏季溫室內水汽對流旺盛，溫室屋頂以開窗方式使水汽能藉由對流排出室外，此具有冷却空氣的效果。如果水汽無法完全排出，或溫室內外溫差過大時，在披覆材料內層容易在表面凝結水滴，尤其容易阻擋太陽輻射穿透之未處理表面塗劑者。Pollet and Pieters(1999)比較乾及溼披覆材料之輻射穿透率，二種處理在入射角由 0-55°間呈定值，濕的表面減少輻射量約 23%，之後隨入射角度增加則兩者差距縮小，75°時相差僅 3%，同時就一天的累積輻射量而言，凝結水滴的批覆材料約減少 15%的輻射量，有些報告則指出相差約 9-19%[33]或低於 8%[12]，這和所選擇覆蓋材料及測量時微氣象有關。溫室內水汽凝結除影響輻射量外，凝結水滴掉落在作物葉片上，或造成空氣相對溼度增高，容易引發病蟲害的發生。因此，增加開窗面積及內循環風扇可增加空氣擾動，使溫室內上下對流增加，葉片蒸散作用旺盛，蒸散流帶動土壤營養成分的吸收，同時穩定葉片溫度，有助於各種生理代謝及酵素活性，可使作物適應夏季高溫環境。

在密閉或半密閉的溫室環境中，二氧化碳濃度和外界不同，由實測資料顯示，溫室內外差異可達 150 ppm，一般稱此現象為二氧化碳缺乏(CO_2 depletion)[9,14]；溫室內 CO_2 偏低的原因主要為作物吸收及 CO_2 通量(flux)減少所致。對

作物而言，CO_2缺乏不利於乾物質累積及產量，因此，溫室內添加CO_2是在避免 CO_2缺乏[34]，惟添加 CO_2增加生產成本。利用外界新鮮空氣送進溫室，或在作物行光合作用時增加換氣率，可改善 CO_2 缺乏的現象[37]。同時，若能提高溫室內 CO_2 濃度可增加光合作用速率，有助於生質量(biomass)的累積；因此，國外相當多有關溫室內添加 CO_2對作物生長影響的研究[17]，而 CO_2添加方式可由氣體鋼瓶或燃燒方式產生。夏天在溫室種植果菜類作物因高溫必須增加通氣，於溫室內添加 CO_2 並不可行，冬季雖可以較密閉方式種植，但溫室內水汽仍需排出以減少病害發生，較可行方式是在地下鋪設管路，氣體直接供應葉片進行固碳作用，而不以整棟溫室作控制。

覆蓋材料特性及溫室設計

溫室被覆材料的選擇需由各種角度作考量，包括物料成本、維護成本、氣候條件及栽種作物特性等。而發展具抗霧、UV 穩定、隔離紅外光及可長期使用之材料，則可有效提高 PAR 穿透，節省能源及低維護成本[13]。Papadopoulos and Hao(1997)比較玻璃、PE 塑膠布及壓克力等材料所搭建溫室之微氣象條件，三種材料之 PAR 穿透率以玻璃 62.6%為高，其次是壓克力 57.9%及 PE 塑膠布 55.7%；而溫室內之溫濕度以 PE 塑膠布最高，壓克力次之，玻璃溫室則最低。雖然玻璃及壓克力材料是較理想之溫室被覆材料，但成本偏高，目前仍以 PE 塑膠布為主。

溫室內日夜溫差極大，可高達 12-19℃(徐等 1992b)。如何調節溫差以提供作物合理溫度範圍，國外在極端氣候條件(如砂漠)所興建溫室的設計可供借鏡。Feuermann *et al.*(1997)將溫室覆蓋材料以液體輻射過濾器(liquid radiation filter)取代，白天將輻射加熱後之液體儲存於熱量交換裝置，夜間再將熱能送回溫室屋頂加溫，同時因避免傳統通風或蒸發冷却，溫室保持密閉環境，可利用添加氣體 CO_2 濃度，以增加作物產量。依據試驗結果，此種溫室設計可周年栽培作物，同時增加產量 14-35%，另由於避免結露，農藥使用量約為傳統溫室 1/4 到 1/8 之間。液體過濾器中添加 1.5 %硫酸銅($CuSO_4$)溶液，可吸收紫外光(200-400nm)和紅外光(700-3000nm)，但作物光合作用所需之可視光(400-700nm)則可完全穿透。減少紅外光則增加紅光/紅外光的比值，有助於高 CO_2環境下作物的生長[11]。事實上，利用硫酸銅過濾紅外光，以控制株高也廣泛用於溫室作物[23,31]。Li *et al.,*(2000)以四種不同濃度之吸收紅外光染劑塗抹於 PE 塑膠布上，並和硫酸銅濾片作比較，染劑濃度越高，則 R：FR 比值越高，

植株高度及節間長度減少約 10-35 %，但硫酸銅濾片所生長苗較矮，原因是硫酸銅為藍色液體，藍光可降低株高[39]。Oyaert *et al.,*(1999) 利用含有不同藍色吸收色素濃度的 PE 膜，比較溫室內菊花的生長，在藍色濾片下，B：R 大幅增加及 R：FR 下降，對作物的影響則是 CO_2 同化速率及乾物重下降。事實上，藍光比值增加將減少葉片及莖之可溶性糖類(蔗糖、果糖及葡萄糖)及澱粉含量[8]。

夏季溫室內高溫可藉由自然通風達到降溫的效果，但在水平風速偏低或垂直對流不旺盛下，無法由通風帶走溫室內的熱氣，尤其是大面積或高度偏低的溫室[4]。將覆蓋物塗抹白色顏料以增加反射，降低輻射負載(radiation load)是一種低成本，改進溫室微氣象的方法。Kittas *et al.,*(1999)認為白色塗料可略為增加可視光在入射輻射能的比例，紅外光相對減少。而 Baille *et al.,*(2001)探討白色玻璃使溫室之輻射穿透係數下降，進而影響微氣象環境。溫度方面，白色塗劑的利用在盛夏具有降溫 5℃的功能，同時群落葉溫對氣溫之差值及水汽壓值明顯下降，另由於高溫獲得改善，溫室內物理環境如可感熱及飽溫比(Bowen ratio)顯著降低，使作物氣孔可完全打開，蒸散作用增加，作物因生長代謝旺盛而有助於生長。就實際運用而言，目前常用黑色塑膠布作為外遮蔭的材料，改用白色材料亦應具有降溫效果，而又不會大幅減少入射輻射量，白色可明顯增加散射光(scatter light)的比例，而這能有效增加作物葉片之輻射利用效率(radiation use efficiency)。

溫室作物之光質需求

溫室披覆材料對於溫室內部微氣象環境扮演具有重要角色，包括太陽入射的光質和光量都能直接影響溫室作物之生長及分化。基本上，太陽輻射的波譜範圍，一般定義在 300-3000 nm，由紫外光(UV)到遠紅外光(far red：FR)之間。植物葉片對光質的需求主要在可視光的光譜範圍(400-700nm)，尤其是藍光(425-490 nm)及紅光(640-740 nm)是光合作用光系統(PSII 及 PSI)所截取之主要光譜。McCree(1972)量測出作物之有效光譜及光量子產量(quantum yield)後，使光質在作物型態發生及生理反應上的影響有更明確的瞭解。而近年來，對光質在生理反應上的研究逐漸受到重視，尤其在光接受體(Photoreceptor)的基礎研究，及光質在作物型態或發育上的控制[24]。

光敏素(phytochrome)是一種具有光轉換功能的蛋白質[35]，含有兩種反應狀態，Pr 為紅光吸收狀態，P_{fr} 為紅外光吸收狀態，輻射光譜中紅光及紅外光

的比值(R：FR)決定 Pr ⇔ P_{fr} 的轉換，可控制發芽、開花和光合作用胞器的發育[18]。因此，作物光型態的反應受紅光/紅外光的比值影響，可用光敏素光平衡值(phytochrome photo-equilibrim；Φ)作表示[31]，如果光環境中，紅光高於紅外光則Φ值較高。Morgan and Smith(1979)指出草本植物莖伸長比例和Φ值有關。Casal *et al*.,(1995)指出 R：FR 比值下降將使節間還原糖量增加，也改變葉片到莖部碳素的分配因此，高紅光生長之植物莖節較高紅外光為短。在溫室產業，生產者會以較密植及將盆栽置於網架上栽培，光的垂直分佈，在群落上方截取紅光，群落下方則紅外光增加，密植下Φ值降低，植株細長及徒長，克服方式可用人工光源增加紅光及降低紅外光的方式，但需增加生產成本及作物生長容易畸型，因光源之光譜分佈不協調[30]。

紫外光對溫室作物之影響

紫外光(尤其 UV-B)破壞葉片光系統而影響農作物產量[21]，在溫室內，UV-B 佔輻射能的比例較田間高[32]，除影響葉片光合作用外，Valkama *et al.*(2003)指出溫室內過多 UV-B 和高硒(selenium；Se)含量的土壤結合使草莓葉片生長受阻，尤其是葉片長度及走莖乾重下降最為顯著。但 UV-B 並非對作物完全有害，Teklemariam and Blake (2003)以低劑量 UV-B 前處理胡瓜幼苗，發現可增加對高溫(44-48℃)的忍受性，主要機制是維持細胞膜完整性，而未前處理之植株在高溫處理後，脂質過氧化及細胞膜滲漏明顯增加。葉片表皮細胞內之類黃酮(flavonoid)是植物的二次代謝產物，也是紅、藍及紫色花色素的主要成份[40]，而 UV-B 則可誘導此種物質的形成。Bieza and Lois (2001)分離出可抗高劑量 UV-B 的阿拉伯芥突變體，發現該植株含有高量的酚類化合物，其中包括類黃酮。因此，目前雖然有商品化抗紫外光之被覆材料，但對於花卉作物的溫室栽培仍應有適當比例的紫外光，以提高花卉的色澤。

結論

台灣農作物之生產面臨多種氣象災害的威脅，其中風雨害更居首位；不論是簡易塑膠溫網室或具有多功能控制之精密溫室，主要目的在於防災，以提供穩定的氣象環境栽培作物。本文所探討適合果菜類生產之溫室，此類溫室之特性在於低成本及盡量減少動力的使用，當然隨著溫室面積逐漸增加，所提供的功能更多樣化，包括產期調節及病蟲害防治等。而溫室栽培之密閉或半密閉環境，仍有許多問題亟須待解決，例如夏季高溫問題，可透過披覆材料的選擇、增加通氣率，溫室內外遮陰、甚至塗抹白色顏料以增加反射，及減少輻射負載

等方法，應可達到降溫的效果。此外，增加溫室內 CO_2 濃度可增加作物固碳速率，有助於作物生產，但除了生產成本考量外，夏季高溫需增加通氣，如何兼顧 CO_2 的利用，是值得思考的問題。依據國外研究報告，利用液體過濾材料減少紅外光進入溫室內，在夏天具有降溫功能，同時溫室保持密閉，才能使 CO_2 有效利用。揭示溫室改進或促進生長的策略，需配合各項現有條件作整體性考量。當然，對溫室內作物的生理反應及微氣象觀測需做更廣泛及精確的研究，以 CO_2 的反應為例，我國溫室內栽培果菜類作物，其生長是否有 CO_2 缺乏的問題？或是提高多少濃度對作物促進程度為何？皆有賴於基礎資料的建立，才能評估各項措施的效益及成本，同時也應建立溫室微氣象條件和作物生長性狀之相關模式，這對於作物產量及栽培曆的建立極為重要，然而過去不論是溫室內或溫室外，包括溫室物理環境的偵測，例如潛熱、可感熱、淨輻射及土壤熱流等通量咸少研究，但卻是水汽或二氧化碳平衡模式建立之基本資料。

引用文獻

1. 姚銘輝、盧虎生、朱鈞 1999 臺灣地區日溫差之分析 中華農學會報 188：32-46。
2. 徐森雄、鍾德月、郭同慶、王少峰 1992a 塑膠布溫室之微氣候研究。I. 溫室之光環境 中華農學會報 157：34-43。
3. 徐森雄、鍾德月、郭同慶、王少峰 1992b 塑膠布溫室之微氣候研究。II. 溫室之熱收支與溫、濕度環境 中華農學會報 157：44-60。
4. Baille, A. 1999. Greenhouse structure and equipment for improving crop production in mild winter climates. Acta Horti. 491：37-49.
5. Baille, A., C. Kittas and N. Katsoulas. 2001. Influence of whitening on greenhouse micro climate and crop energy partitioning. Agric. For. Meteorol. 107：293-306.
6. Bieza, K. and R. Lois. 2001. An *Arabidopsis* mutant tolerant to lethal ultraviolet-B level shows constitutively elevated accumulation of flavonoids and other phenolics. Plant Physiol. 126：1105-1115.
7. Casal, J. J., R. A. Sanchez, A. R. Paganelli-Blau and M. Izaguirre. 1995. Phytochrome effects on stem carbon gain in light-grown mustard seedling are not simply the result of stem extension-growth responses. Physiol. Plant. 94：187-196.
8. Decoteau, D. R., H. A. Hatt, J. W. Kelly, M. J. McMahon, N. Rajapakse, R. E.

Young and P. K. Pollock. 1993. Applications of photomorphogenesis research to horticultural system. Sci. Horti. 28：274.

9. Drakes, G. D. 1984. Prevention of CO_2 depletion in tomatoes. Acta Horti. 162:245-247
10. Feuermann, D., R. Kopel, M. Zeroni, S. Levi and J. Gale. 1997. Theory and validation of a liquid radiation filter greenhouse simulation for performance prediction. Trans. of ASAE 40：175-184.
11. Feuermann, D., R. Kopel, M. Zeroni, S. Levi and J. Gale. 1998. Evaluation of a liquid radiation filter greenhouse in a desert environment. Trans. ASAE 41：1781-1788.
12. Geoola, F., V. M. Peiper. and F. Geoola. 1994. Outdoor testing of the condensation characteristics of plastic film covering materials using a model greenhouse. J. Agric. Eng. Res. 57：167-172.
13. Giacomelli, G. A. and W. J. Roberts. 1993. Review：greenhouse covering system. HortTec. 3：50-58.
14. Heij, G and P. J. DeLint. 1984. Prevailing CO_2 concentration in glasshouses. Acta Horti. 162:93-99.
15. IPCC, 1995: Climate change 1995. The Supple mentary Report to IPCC Scientific Assessment. Cambridge : Cambridge University Press.
16. IPCC, 2001. In：Houghton, J. T., Ding, Y., Griggs, D. J., Noguer, M., van der Linden, P. J., Xiaosu, D. (Eds.), Climate change 2001：The Scientific Basis. Cambridge University Press, UK.
17. Jaffrin, A., N. Bentounes, A. M. Joan and S. Makhlouf. 2003. Landfill biogas for heating greenhouses and providing carbon dioxide supplement for plant growth. Biosystem Eng. 86:113-123.
18. Kim, J. I., G. V. Kozhukh and P. S. Song. 2002. Phytochrome-mediated signal transduction pathways in plant. Biochem. and Biophy. Res. Com. 298:457-463.
19. Kittas, C., A. Baille and P. Giaglaras. 1999. Influence of covering material and shading on the spectral distribution of light in greenhouse. J. Agric. Eng. Res. 73：341-351.
20. Li, S., N. C. Rajapakse, R. E. Young and R. Oi. 2000. Growth responses of

chrysanthemum and bell pepper transplants to photoselective plastic films. Sci. Horti. 84：215-225.

21. Mazza, C. A., D. Battista, A. M. Zima, M. Szwarcberg－Bracchitta, C. V. Giordano, A. Acevedo, A. L. Scopel and C. L. Ballare. 1999. The effects of solar ultraviolet-B radiation on the growth and yield of barley are accompanied by increase DNA damage and antioxidant responses. Plant Cell Environ. 22：61-70.
22. McCree, K. J. 1972. The action spectrum, absorptance and quantum yield of photosynthesis in crop plants. Agric. Meteorol. 9：191-196.
23. McMahon , M. J., J. W. Kelly, D. R. Decoteau, R. E. Young and P. K. Pollock. 1991. Growth of *Dendranthema x grandiflorum(Ramat.)* Kitamura under various spectral filters. J. Am. Soc. Hort. Sci. 116：950-954.
24. Mockler, T., H. Yang, X. H. Yu, D. Parikh, Y. C. Cheng, S. Dolan and C. Lin. 2003. Regulation of photoperiodic flowering by *Arabiopsis* photoreceptors. Proc. Natl. Acad. Sci. 100:2140-2145.
25. Morgan, D. C. and H. Smith. 1979. A systematic relationship between phytochrome－controlled development and species habit, for plant growth in simulated natural radiation. Planta 145：253-258.
26. Oyaert, E., E. Volckaert and P. C. Debergh. 1999. Growth of chrysanthemum under coloured plastic films with different light qualities and quantities. Sci. Horti. 79：195-205.
27. Pajapakse, N. C. and J. W. Kelly. 1992. Regulation of chrysanthemum growth by spectral filter. J. Am. Soc. Horti. Sci. 117：481-485.
28. Papadopoulos, A. P. and X. Hao. 1997. Effects of greenhouse covers on seedless cucumber growth, productivity, and energy use. Sci. Horti. 68：113-123.
29. Pollet, I. V. and J. G. Pieters. 1999. Laboratory measurements of PAR transmittance of wet and dry green house cladding materials, Agric. For. Meteorol. 93：149-152.
30. Protasova, N. N., J. M. Welles, M. W. Dobrovolskii and L. N. Tsoglin. 1990. Spectral characteristics of light sources and plant growth peculiarities under artificial illumination. Soviet Plant Physiol. 37：293-303.

31. Rajapakse, N. C. and J. W. Kelly. 1992. Regulation of chrysanthemum growth by spectral filters. J. Am. Soc. Hort. Sci. 117：481-485.

32. Rozema, J., J. W. M. Van de Staaij, L. O. Bjorn and M. Caldwell. 1997. UV-B as an environmental factor in plant life：stress and regulation. Trends Ecol. Evol. 12：22-28.

33. Schultz, W. and K. H. Bartnig. 1996. Evaluation of the non drip properties of greenhouse cladding film. Plasticulture 111：23-35.

34. Slack, G and D. W. Hand. 1986. Weighing up the cost effectiveness of summer enrichment. Grower 105:15-18.

35. Smith, W. O. 1983. Phytochrome the molecule. *In*：Encycl. Plant Physiol., New Ser. 16A. W. A. Shropshire and H. Mohr(*eds*).Springer－Verlag, New York. pp 96-115.

36. Teklemariam, T. and T. J. Blake. 2003. Effects of UV-B preconditioning on heat tolerance of cucumber(*Cucumis sativus L.*). Environ. Exp. Bot. 50:169-182.

37. Trigui, M., S. Barrington and L. Gauthier. 2001. A strategy for greenhouse climate control. Part I : Model development. J. Agric. Engng. Res. 78 : 407-413.

38. Valkama , E., M. Kivimäenpää, H. Hartikainen and A. Wulff. 2003. The combined effects of enhanced UV-B radiation and selenium on growth, chlorophyll fluorescence and ultrastructure in strawberry(*Fragaria x ananassa)*and barley(*Hordeum vulgare*)treated in the field. Agric. and For. Meteorol. 120：267-278.

39. Warpeha, K. M. and L. S. Kaufman. 1989. Blue-light regulation of epicotyl elongation in *Pisum Sativas.* Plant Physiol. 89：544-548.

40. Winkel-Shirley, B. 2001. Flavonoid biosynthesis：a colorful model for genetics biochemistry, cell biology and biotechnology. Plant Physiol. 126：485-493.

Validation of a Greenhouse for Fruit and Vegetable Crops

Ming-Hwi Yao and Lien-Sheng Liang
Agricultural Engineering Division, Agriculture Research Institute,
Council of Agriculture, Taiwan, ROC

Abstract

Light transmitted by greenhouse cladding or shading materials is essential to influence on the growth and development of plants. This review article collected abundant literature to evaluate the light quality and quantity within greenhouse with different photoselective plastic films. In addition to, greenhouse cooling is an important matter during sunny summer days of Taiwan. Natural ventilation is the normal practice, however, it is not sufficient for extracting the excess energy. Therefore, whitening the cover material or shading the greenhouse may be considered as the strategy of cooling. UV light induces the synthesis of flavonoids which are the important component of flower pigments for plant, therefore, the UV-cut plastic sheet should be avoid when cultivated flower crops in greenhouse. Many greenhouse crops respond favorably to CO_2 enrichment, however, the constraints was found in crop response efficiency and method of implementation, such as cost, climate and CO_2 distribution.

Key words：Greenhouse；Cladding materials；Light quality；Phytochrome；Transmissivity